

Höhenbestimmung der in der Dämmerung leuchtenden atmosphärischen Natriumschicht

Cario, Günther
Stille, Ulrich

Veröffentlicht in:
Abhandlungen der Braunschweigischen
Wissenschaftlichen Gesellschaft Band 2, 1950, S.40-66



Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig

Höhenbestimmung der in der Dämmerung leuchtenden atmosphärischen Natriumschicht

Von G. Cario und U. Stille

Mit 9 Abbildungen

Abstract: This paper reports on observations of the D-lines of sodium in the twilight made at Braunschweig in 1941. The sudden decrease of intensity of the sodium lines in the evening twilight and the sudden enhancement in the morning twilight was photographed in short intervals with a spectograph of high aperture in two directions (zenith and horizon). The evaluations of the spectra show that the D-lines must be excited by ultraviolet light of the sun, for which the ozone-layer of the upper atmosphere is not transparent. The upper limit of this screening ozone layer was determined to 54 ± 3 km. The sodium layer shows also a sharp upper limit at $118 \pm 2,5$ km. Occasional observations show a not well defined under limit of the sodium layer at $106,5 \pm 6$ km corresponding to a thickness of $11,5 \pm 6,5$ km for the light-emitting sodium layer. The possible errors are discussed thoroughly. The obtained values are in good agreement with results of other authors.

1. Einführung. In einer früher erschienenen Veröffentlichung hatten die Verfasser⁵⁾ über die Bestimmung und Deutung der Schichtgrenzen für die Natrium enthaltende Atmosphärenschicht aus dem Dämmerungsleuchten der *Na-D*-Linien berichtet. Dort wurden die von Bernard¹⁾ im November 1937 in Tromsø für den Dämmerungseffekt der *D*-Linien durchgeführten Messungen der weiteren Behandlung des Problems zugrunde gelegt. Dabei gingen die Verfasser von der Annahme aus, daß es sich bei der Emission der *D*-Linien im Dämmerungsleuchten um eine durch Sonnenlicht angeregte Resonanzfluoreszenz des in höheren Atmosphärenschichten vorhandenen Natriums handele. Als für das Sonnenlicht bei der Anregung dieser gelben Resonanzfluoreszenz wirksame Schattengrenze wurde nicht die Erdoberfläche selbst, sondern die obere Grenze der Troposphäre mit 8 km über dem Erdboden angesetzt, da nach den hierüber vorliegenden Beobachtungen die Troposphäre für streifend durchtretendes Sonnenlicht in dem fraglichen Spektralbereich praktisch lichtundurchlässig ist.

Unter diesen Gesichtspunkten konnten die Verfasser aus den Bernard'schen Beobachtungen für die obere Grenze der in den *D*-Linien fluoreszierenden Natriumschicht eine Höhe von etwa 78 km ableiten. Analog ergab sich aus dem seinerzeit vorliegenden experimentellen Material eine Dicke der leuchtenden Natriumschicht von etwa 9 km.

Für eine eingehendere Kenntnis und Beurteilung der physikalischen Bedingungen und Anregungsvorgänge in der Natrium führenden Schicht der oberen Atmosphäre erschienenen u.a. möglichst zahlreiche Beobachtungen des Dämmerungseffektes an den *Na-D*-Linien sehr erwünscht. Die Verfasser haben daher zur weiteren Klärung dieses Problems in den Monaten Februar bis Juni 1941 eigene Messungen des Natriumdämmerungsleuchtens in Braun-

schweig durchgeführt, welche zunächst von den von Bernard mitgeteilten Ergebnissen stark abweichende Resultate ergaben*).

Noch während dieser Untersuchungen wurde eine Arbeit von Vegard und Tønsberg¹⁴⁾ bekannt, welche u.a. Ergebnisse über den Dämmerungseffekt an den *Na-D*-Linien aus Dämmerungsspektren enthält, welche Vegard und Tønsberg schon 1939 in Oslo und Tromsø aufgenommen hatten.

Da weiterhin die in der früheren Veröffentlichung⁵⁾ auf Grund der Bernardschen Messungen angegebene Höhe für die obere Grenze der leuchtenden Natriumschicht von rund 80 km in der Literatur^{11, 8)} zu Diskussionen und Folgerungen allgemeiner Art geführt hat, welche bei Kenntnis der eigenen Meßergebnisse und der Beobachtungsergebnisse von Vegard und Tønsberg nicht aufrecht zu erhalten sind, soll in der vorliegenden Arbeit eine Beschreibung der eigenen Untersuchungen aus dem Jahre 1941 gegeben werden.

2. Die Meßmethode. Bernard²⁾ hatte schon auf die Möglichkeit der Anregung der *D*-Linien durch Photolumineszenz infolge ultravioletter Sonnenstrahlung hingewiesen. In diesem Falle würde die aus dem Dämmerungseffekt abgeleitete obere Grenze der leuchtenden Natriumschicht wesentlich höher zu suchen sein, da bei Anregung durch ultraviolettes Sonnenlicht nicht mehr die Troposphäre, sondern die Obergrenze der Ozonschicht als untere Grenze der atmosphärischen Lichtdurchlässigkeit anzusehen ist. Bernard selbst errechnet für diesen Fall einer als Photolumineszenz angenommenen Emission der *D*-Linien unter Berücksichtigung der Ozonabsorption aus dem von ihm beobachteten Dämmerungseffekt eine Höhe von etwa 110 km für die obere Grenze der leuchtenden Natriumschicht.

Falls die Emission der *Na-D*-Linien als Photolumineszenz gedeutet werden müßte, geht in die Behandlung des Dämmerungseffektes außer der oberen Grenze der leuchtenden Schicht noch die obere Grenze der die anregende UV-Strahlung abschirmenden Schicht ein, deren Höhe ebenfalls experimentell zu bestimmen bliebe. Da also zwei Höhenlagen in der Atmosphäre als Unbekannte auftreten können, mußte das Meßverfahren von vornherein so angelegt werden, daß die einzelne Dämmerungseffektbeobachtung auch zwei Meßergebnisse liefert.

Das Prinzip des angewandten Verfahrens soll an Hand der Fig. 1, welche eine schematische Darstellung des Strahlenganges der Sonnenstrahlen, durch die Atmosphäre darstellt und der Fig. 1 der voraufgegangenen Veröffentlichung⁵⁾ entspricht, erläutert werden. Mit R ist das Erdbodenniveau am Beobachtungsort, mit $R + a$ die Höhe der Obergrenze der die anregenden Sonnenstrahlen abschirmenden Schicht und mit $R + H$ diejenige der oberen Grenze der leuchtenden Natriumschicht in der Atmosphäre gekennzeichnet. Die Beschreibung des beobachteten Dämmerungseffektes verläuft vollkommen analog den entsprechenden Ausführungen zu der Fig. 1 der voraufgegangenen Arbeit, auf welche hier einfach verwiesen werden kann.

Für einen in B befindlichen Beobachter taucht im Zenith ($\zeta = 0$) die

*) Hierüber wurde auf einer vom Stratosphärenausschuß der Deutschen Akademie der Luftfahrtforschung im Herbst 1941 einberufenen Tagung berichtet; über diese Ergebnisse ist ein zusammenfassender Überblick im Tagungsbericht niedergelegt worden. Eine ausführliche Darstellung der Versuchsanordnung und der mit ihr erzielten Resultate ist bislang aus äußeren Gründen unterblieben.

obere Grenze der Natriumschicht an der Stelle C_1 zur Zeit t_1 gerade in den Schatten der abschirmenden Schicht, deren Obergrenze in diesem Augenblick bei A_1 vom anregenden Sonnenlicht streifend berührt wird. Bei Weiterdrehung

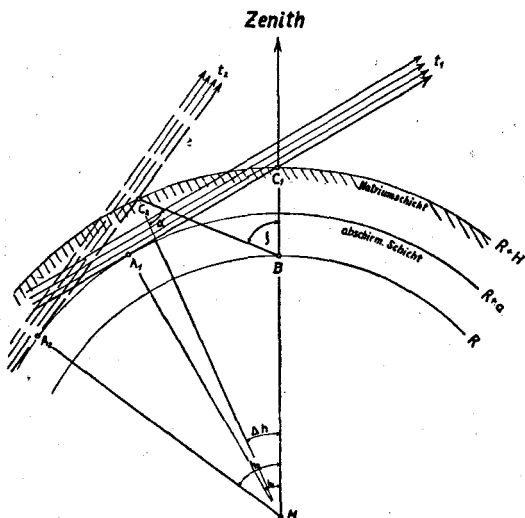


Fig. 1. Schematische Darstellung des Strahlenganges der Sonnenstrahlen durch die Atmosphäre bei Zenithbeobachtung (—) und bei Horizontbeobachtung (---).
(Die einzelnen Höhen sind nicht maßstäblich gezeichnet).

der Erde erreicht die die Photo-lumineszenz anregende Sonnenstrahlung die Natriumschicht im Zenith über dem Beobachter nicht mehr — d.h. bei nach oben genügend scharfer Begrenzung der leuchtenden Natriumschicht ist in dem Zeitpunkt t_1 die Intensität der emittierten D -Linien auf den Wert abgesunken, welchen sie auch während der Nacht im Nachthimmelleuchten beibehält. Dabei entstammt die Emission der D -Linien im leuchtenden Nachthimmel zweifelsohne einem anderen Anregungsprozeß als das Dämmerungsleuchten der gelben Linien⁴⁾.

Für Zenithwinkel $\zeta > 0$ wird zu dem Zeitpunkt t_1 die

Natriumschicht noch teilweise oder ganz vom Sonnenlicht getroffen. Mit fortschreitender Zeit dreht sich die Erde und damit der Beobachtungsort B im Uhrzeigersinn unter den Sonnenstrahlen weiter. Diese zeitliche Bewegung von B ist in der Fig. 1 durch eine entgegengesetzte Verschiebung des Strahlenganges für die anregenden Sonnenstrahlen dargestellt worden. Zu einem Zeitpunkt t_2 durchsetzen diese Sonnenstrahlen die Atmosphäre so, daß die durch die abschirmende Schicht bedingte Schattengrenze (streifender Berührungspunkt in A_2) gerade die obere Grenze der Natriumschicht an der Stelle C_2 schneidet, die der Beobachter in B unter dem Zenithwinkel ζ sieht. Im nächsten Augenblick entfällt die Anregung zum Natriumleuchten in C_2 — die Intensität der emittierten D -Linien hat ihren „Nacht“-Wert erreicht.

In B wird also zu den Zeiten t_1 und t_2 im Zenith bzw. unter einem Zenithwinkel ζ der Dämmerungseffekt an den D -Linien beobachtet.

Die Auswertung der beiden Dämmerungsbeobachtungen, d.h. die Berechnung der Höhen a und H aus den beiden gemessenen Zeiten t_1 und t_2 erfolgt folgendermaßen. B hat vom Erdmittelpunkt den Abstand des Erdradius $R = \overline{MB}$; die Strecke $\overline{MA_1}$ ist gleich $R + a$ und die Strecke $\overline{MC_2} = R + H$. Aus dem Dreieck $\overline{MC_2}B$ folgt:

$$\frac{R+H}{R} = \frac{\sin(180^\circ - \zeta)}{\sin \alpha} = \frac{\sin \zeta}{\sin(\zeta - \Delta h)}, \quad (1)$$

woraus sich für die Höhe der oberen Grenze für die leuchtende Natriumschicht

$$H = R \left[\frac{\sin \zeta}{\sin (\zeta - \Delta h)} - 1 \right] \quad (2)$$

ergibt. Das Dreieck MA_1C_1 liefert die Beziehung

$$\cos h_1 = \frac{R + a}{R + H}, \quad (3)$$

oder für die Obergrenze der abschirmenden Schicht

$$a = (R + H) \cos h_1 - R. \quad (4)$$

Die Gleichungen (2) und (4) für H und a enthalten noch h_1 und $\Delta h = h_1 - h_2$, wobei h_1 und h_2 die Sonnenhöhen zu den Beobachtungszeiten t_1 und t_2 bedeuten. Die in *MEZ* gemessenen Zeiten t werden mit der geographischen Länge λ des Beobachtungsortes auf mittlere Ortszeit und unter Berücksichtigung der Zeitgleichung auf wahre Ortszeit umgerechnet, aus welcher sich der Stundenwinkel τ (gegen Sonnenkulmination gerechnet) ergibt. Die zugehörige Sonnenhöhe h erhält man dann mit der geographischen Breite φ des Beobachtungsortes und der Sonnendeklination δ aus der Beziehung

$$\sin h = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \tau. \quad (5)$$

Diese Überlegungen ergeben für die Meßapparatur folgendes. Die Intensität der *D*-Linien im Dämmerungsleuchten muß während der Dämmerung einmal im Zenith über dem Beobachtungsort und anschließend unter einem Zenithwinkel ζ messend verfolgt werden. Dieser Zenithwinkel ist so groß zu wählen, daß genügend Zeit bleibt, um nach im Zenith beobachteten Dämmerungseffekt die Apparatur rechtzeitig auf diese Richtung ζ umzuschalten; auf der anderen Seite darf ζ nicht so groß werden, daß durch eine zu horizontale Beobachtungsrichtung auf längeren Wegen streifend durchgesetzter Dunst in den untersten Atmosphärenschichten die Messung wesentlich beeinflusst. Weiter muß bei festem Zenithwinkel ζ in Richtung der bereits unter dem Horizont stehenden Sonne beobachtet werden, damit die Schattengrenze sich stets senkrecht zu der Ebene durch die Beobachtungsrichtung und die Vertikale im Beobachtungsort bewegt. Die Intensitätsmessung an den *D*-Linien erfordert eine spektrale Zerlegung des Dämmerungsleuchtens, d.h. es müssen in zeitlich möglichst kurzer Folge in beiden Beobachtungsrichtungen mit einem lichtstarken Spektographen ausreichender Dispersion Aufnahmen gemacht werden, aus denen dann die beiden Zeiten t_1 und t_2 aus dem jeweiligen Intensitätsabfall der photographierten *D*-Linien zu bestimmen sind.

3. Der Spektograph. Bernards Messungen ergaben bereits, daß der Intensitätsabfall in der *D*-Linien-Emission auf den „Nacht“-Wert — d.h. auf etwa 1% der während der Dämmerung unter Sonneneinstrahlung vorhandenen Intensität — innerhalb weniger Minuten stattfindet, wobei diese Zeit noch von der Jahreszeit und der geogr. Breite des Beobachtungsortes — d.h. der Wanderungsgeschwindigkeit der Schattengrenze am Beobachtungsort — abhängt. Wenn man also eine möglichst genaue Festlegung der Zeitpunkte t_1 und t_2 anstrebt, sind an das Auflösungsvermögen der Anordnung sehr hohe Anforderungen zu stellen. Die Belichtungszeiten für die einzelnen, aufeinander folgenden Spektren müssen möglichst kurz bemessen sein — d.h. nur ein Spektograph großer Lichtstärke gestattet die Durchführung der Untersuchungen.

Als Spektograph wurde ein 1-Prismenspektograph benutzt, welcher eigens für Nachthimmeluntersuchungen gebaut und von dem einen der Verfasser schon früher für Beobachtungen des Nachthimmelleuchtens eingesetzt worden war³⁾. Der Aufbau des Spektographen ist in seinen Grundzügen aus der Fig. 2a oder 2b zu ersehen. Das Flintglas-Prisma Pr hat eine Basis von 107 mm und eine Höhe von 60 mm, seine Brechzahl beträgt für die D -Linien $n_D = 1,65$. Als Kameraobjektiv L_{Ka} wurde ein Zeiss-R-Biotar-T (mit reflexminderndem Belag auf allen Flächen) der Lichtstärke 1 : 0,85 und einer Brennweite von $f_{Ka} = 5,5$ cm benutzt⁴⁾. Als Spalt Sp diente ein einseitig verschiebbarer Steinheilspalt, als Kollimatorlinse L_{Ko} ein achromatisches Zeiss-Kollimatorobjektiv von $f_{Ko} = 72$ cm Brennweite.

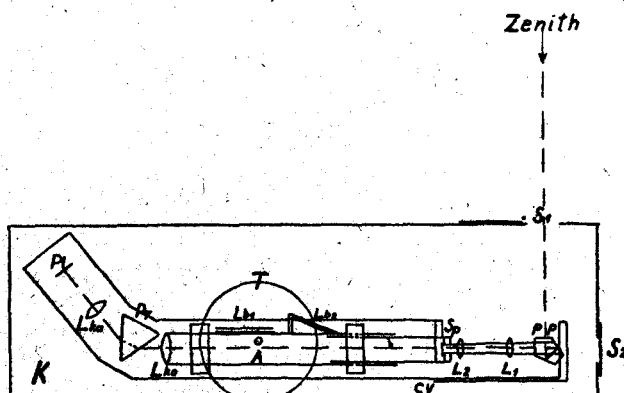


Fig. 2a. Gesamte Meßanordnung für Zenithbeobachtung.

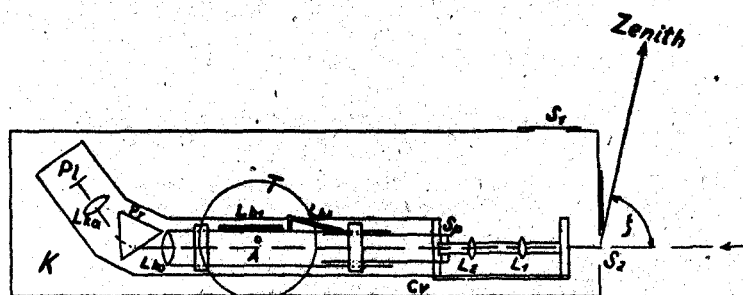


Fig. 2b. Gesamte Meßanordnung für Horizontbeobachtung.

Die Aufnahmeplatten Pl wurden in eine Rolleiflexkassette eingelegt, welche nach Herausziehen des Kassettenschiebers durch Federdruck die Platte fest gegen zwei Anschlagstäbe andrückte. Diese beiden Stäbe waren senkrecht auf einem Querbalken befestigt, welcher seinerseits um einen Drehpunkt schwenkbar auf dem Kameraschlitten montiert war. Durch Vor- und Rückwärts-

*) Weiterhin stand eine nicht achromatisierte asphärische Linse der Firma Carl Zeiss mit einer Lichtstärke von 1 : 1,4 und einer Brennweite $f = 7,0$ cm zur Verfügung, welche gelegentlich bei einigen Aufnahmen benutzt wurde.

verschiebung dieses Schlittens und Schwenkung des Querbalkens um den Drehpunkt mittels feingängiger Spindeln wurde eine äußerst exakt arbeitende Scharfeinstellung der Platte auf die Fokalebene der Kamera gewährleistet, was bei der großen Lichtstärke unbedingt erforderlich ist. Zwischen den beiden Anschlagstäben wurde eine geschwärzte Metallplatte mit einem horizontalen Schlitz von 2,5 mm Breite und 30 mm Länge in Höhe des spektral zerlegten Strahlenganges zur Ausblendung des Spektrums befestigt. Hinter diesem Schlitz ist die Platte mitsamt der Kassette in vertikaler Richtung beweglich, so daß nacheinander 7 Spektren auf einer Platte aufgenommen werden konnten. Durch eine Einrastvorrichtung war für eine gleichmäßig definierte Lage dieser 7 Spektren auf der Platte gesorgt. Die Belichtungen wurden mittels eines hinter dem Spalt auf dem verschiebbaren Tubus des Kollimatorrohres angebrachten Compurverschlusses CV mit Drahtauslöser durchgeführt. Als Plattenmaterial dienten (nicht übersensibilisierte Agfa-ISS-Platten vom Format $4,5 \times 6 \text{ cm}^2$ und einer Empfindlichkeit von $\frac{21^0}{10}$ DIN. Die Platten wurden mit Rodinal (1 : 10) ca. 6 Minuten entwickelt.

Eine achromatische Beleuchtungslinse L_1 der Brennweite $f_1 = 16 \text{ cm}$ bildete einen Teil des Himmels auf den Spalt ab. Diese Beleuchtungslinse L_1 wurde durch eine zweite achromatische Linse L_2 in das Kollimatorobjektiv abgebildet. Beide Linsen sind verschiebbar auf einer Metallschiene gehalten, welche mit der Grundplatte des Spektographen starr verbunden ist. Der Strahlengang vom Kollimatorobjektiv über Prisma und Kameraobjektiv ist bis zur Photoplatte durch Aufsatzkästen und Balge lichtdicht abgeschlossen.

Für die Einstellung der Spaltbreite waren folgende Gesichtspunkte maßgebend. Der Spektograph wurde mit horizontalem Spalt gegen den Dämmerungshimmel gerichtet, so daß die wandernde Schattengrenze stets parallel zum Spalt blieb. Dann ist der Winkelbereich $\Delta\zeta$, welcher bei den Dämmerungsaufnahmen am Himmel erfaßt wird, durch die Spaltbreite s und die Brennweite f_1 der Beleuchtungslinse L_1 gegeben als

$$\Delta\zeta = \frac{s}{f_1} \quad (6)$$

Dieser Winkelbereich ist möglichst klein zu halten, wenn man ein hohes Auflösungsvermögen der Gesamtapparatur anstrebt. Um einen im gelben Spektralbereich am Dämmerungshimmel etwa durch Streulicht vorhandenen kontinuierlichen Untergrund weitgehend gegenüber den D -Linien zu schwächen, muß der Spalt ebenfalls möglichst schmal sein. Auf der anderen Seite darf man mit Rücksicht auf die Korngröße der Photoplatte die Spaltbreite s nicht beliebig eng wählen.

Der Spalt wird im Verkleinerungsverhältnis der Brennweiten f_{K0} und f_{Ka} des Kollimator- und Kameraobjektivs auf der Platte mit einer effektiven Breite

$$s_{\text{eff}} = s \cdot \frac{f_{Ka}}{f_{K0}} = 0,0763 \cdot s \quad (7)$$

abgebildet. Als optimaler Wert ergab sich aus Vorversuchen eine Breite $s = 0,75 \text{ mm}$, woraus für den Winkelbereich $\Delta\zeta$, welcher am Himmel eingefangen wird,

$$\Delta \zeta = \frac{0,75}{160} = 4,69 \cdot 10^{-3} \text{ (Radiant)} = 16,11' \quad (6a)$$

folgt. Daß dieser Winkelbereich in die Festlegung der Zeiten t_1 und t_2 einen wesentlich kleineren Fehler hineinträgt, als er durch andere Meßungenauigkeiten bedingt ist, wird zahlenmäßig in Abschnitt 6 belegt werden. Die effektive Spaltbreite beträgt dann

$$s_{\text{eff}} = 0,0763 \cdot 0,75 = 0,0573 \text{ mm} = 57,3 \mu, \quad (7a)$$

ein Wert, welcher dem Plattenkorn der Agfa-ISS-Platte weitgehend angepaßt ist*).

Die Höhe des Spektrums wird durch die Spalthöhe bedingt. Diese wurde mittels des keilförmigen Schiebers am Steinheilsplatt auf ca. 20 mm begrenzt, woraus für die Spektrallinien auf der Photoplatte eine Höhe von 1,5 mm resultiert. Die Dispersion betrug im Spektralgebiet der D -Linien 760 Å/mm.

Der ganze Spektograph wurde mitsamt der Spaltbeleuchtungseinrichtung zentriert und photographisch mit einer technischen Natriumdampflampe justiert. Vorversuche am Dämmerungshimmel ergaben, daß eine Belichtungszeit von 2 Minuten zu ausreichenden Schwärzungen der Platten führte. Da sich jedoch zeigte, daß eine Festlegung der Zeiten t_1 und t_2 bei tiefer geschwärzten und entsprechend kontrastreicher Schichten trotz der hierzu erforderlichen längeren Belichtungsintervalle genauer vorgenommen werden konnte, wurde im allgemeinen mit Belichtungsintervallen von 3 bis 4 Minuten und gelegentlich noch mehr gearbeitet.

4. Die Gesamtanordnung. Die Montage des Spektographen und seine Einrichtung auf die beiden Beobachtungsrichtungen $\zeta = 0$ (Zenith) und $\zeta = \zeta$ (Horizont) ist in den Fig. 2a und 2b schematisch dargestellt. Der Spektograph wurde zunächst in einen Holzkasten K eingesetzt und mit seiner Grundplatte durch eine Seitenwand mit einer Teilkreisplatte T von 30 cm Durchmesser verschraubt. Der Holzkasten besitzt für die Abbildung des Dämmerungshimmels auf den Spektographensoalt 2 durch Schieber verschließbare Öffnungen S_1 und S_2 .

Mit dem Kollimatorrohr sind durch Schellenhalterung zwei Libellen fest verbunden. Die eine Libelle Lb_1 liegt in Längsrichtung auf dem Kollimatorrohr auf und dient zur Horizontaleinrichtung des Spektographen. Durch Beobachtung mit einem Universalinstrument wurde diese Libelle so einjustiert, daß die optische Achse durch das Kollimatorrohr und die mit dem Kollimatorobjektiv zentrierten Beleuchtungslinsen L_1 und L_2 bei Einspielen der Libelle horizontal verläuft. Durch ein vor der Linse L_1 aufgesetztes Pentagonprisma PP wird der Strahlengang um 90° geknickt, so daß bei Einspielen der Libelle Lb_1 der Zenith über dem Beobachtungsort vom Spektographen durch die Öffnung S_1 anvisiert wird.

Die zweite Libelle Lb_2 ist gegenüber der ersten um einen Winkel $90^\circ - \zeta$ geneigt; dieser Winkel konnte durch eine feingängige Spindel mit Gegenfeder sehr genau eingestellt werden. Bei Drehung der ganzen Anordnung um die horizontale Achse A der Teilkreisplatte T spielt die Libelle Lb_2 ein, wenn die Beobachtungsrichtung des Spektographen mit der Horizontalen einen Winkel

*) Die Körnigkeit dieser Platte beträgt etwa 10–15 μ .

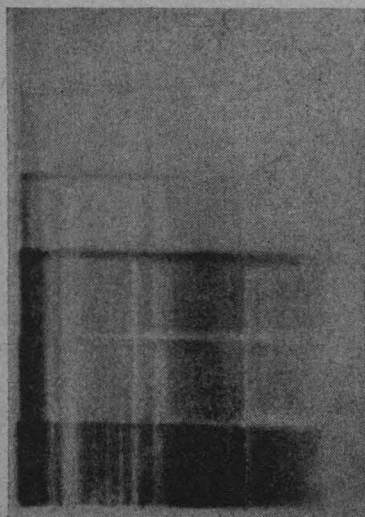
von $90^\circ - \zeta$ bildet, d.h. wenn der Spektograph auf den Dämmerungshimmel unter einem Zenithwinkel ζ gerichtet ist. Der Winkel $90^\circ - \zeta$ zwischen der zentrierten optischen Achse des Spektographen und der Horizontalen wurde wieder mit dem Universalinstrument kontrolliert bzw. gemessen. Die Ablesegenauigkeit am Universalinstrument und die Empfindlichkeit der benutzten Libellen garantierte die Festlegung und Einhaltung der Horizontalen bzw. der ζ -Richtung auf zumindest $\pm 1'$. D.h. der Fehler, welcher durch diese Richtungsjustierung eingeht, ist um etwa eine Größenordnung kleiner, als der durch die endliche Spaltbreite s bedingte Fehler $\Delta\zeta$ (6a). Für die Dämmerungseffektmessungen wurde zunächst ein Zenithwinkel $\zeta = 73^\circ 14'$ und vom 12.5.41 ab $\zeta = 74^\circ 57' 30''$ benutzt.

Die Achse A der Teilkreisplatte T war auf einem Wagen in etwa 125 cm Höhe über dem Erdboden drehbar gelagert. Der Wagen war in geschweißter Stahlrohrkonstruktion eigens für diesen Zweck gebaut und gestattete, die ganze Anordnung für die Dämmerungsaufnahmen in bequemer Weise aus einem Abstellraum ins Freie zu bewegen und jeweils in die richtige Beobachtungsrichtung zu bringen.

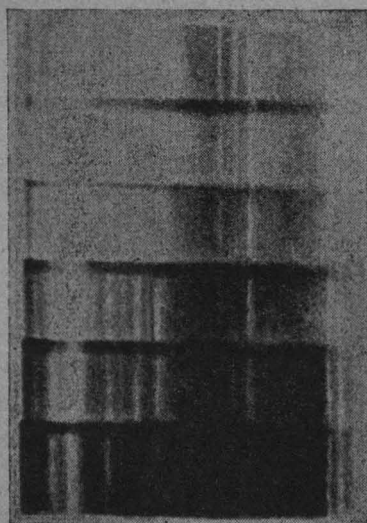
Als Beobachtungsort wurde ein am Stadtrand liegendes Gartengrundstück gewählt, welches freien Ausblick in Richtung der Morgen- und Abenddämmerung bis zum Horizont herunter gewährte und durch Bodendunst in diesen Richtungen praktisch nicht beeinträchtigt war. Die geographischen Daten sind: $\varphi = 52^\circ 16' 9''$ nördl. Breite und $\lambda > 10^\circ 31' 16''$ ostw. Greenwich.

Aufnahmen wurden sowohl während der Abend- als auch während der Morgendämmerung gemacht. Die Aufnahmetechnik wickelte sich dann z.B. bei Beobachtung während der Abenddämmerung folgendermaßen ab. Der Wagen wurde ins Freie gefahren und der Spektograph bezüglich des Azimuts in Richtung der schon unter dem Horizont stehenden Sonne gebracht. Eine Kreuzlibelle auf der Achse der Teilkreisplatte diente dazu, die ganze Anordnung und damit den Spektographenspalt horizontal einzujustieren. Dann wurde die Kassette mit eingelegter Platte eingeführt und der Kassettenschieber herausgezogen. Nach Öffnen des Schiebers S_1 und Einsetzen des Pentagonprismas PP wurde die Teilkreisplatte mit dem Spektographen so lange gedreht, bis die Libelle Lb_1 einspielte und somit der Spektograph in Zenithstellung aufnahmebereit war. Während der Zeit des Auftretens des Dämmerungseffektes im Zenith, welche durch vorläufige Vorversuche über die zugehörige Sonnentiefe $-h_1$ ungefähr vorausberechnet werden konnte, wurden unter jeweiligem Weiterschieben der Kassette gegen den Kassettenhalter 7 Spektren aufgenommen und die Zeiten auf einer gegenüber dem Nauener Zeitzeichen kontrollierten Präzisionsuhr abgelesen. Anschließend erfolgte Kassettenwechsel, Ausbau des Pentagonprismas, Schließen des Schiebers S_1 , Öffnen des Schiebers S_2 und Einrichten des Spektographen auf die ζ -Richtung mittels der Libelle Lb_2 . Über den Zeitpunkt des Eintretens des Dämmerungseffektes unter dem Zenithwinkel ζ wurde dann in gleicher Weise die zweite Serie von 7 Spektren aufgenommen. Kassettenwechsel, Plattenverschiebung und Ablesung der Libelleneinstellungen konnte durch entsprechend im Deckel des Holzkastens angebrachte Klappen vorgenommen werden. Bei Aufnahmen während der Morgendämmerung kehrt sich der ganze Ablauf bezüglich der beiden Beobachtungsrichtungen um. Zum Wechsel zwischen diesen beiden

Beobachtungsrichtungen war stets genügend Zeit vorhanden, da je nach der Jahreszeit die Zeitdifferenz $t_2 - t_1$ zwischen etwa 20 und 45 Minuten lag.



↑
Fig. 3a. Dämmerungsleuchten im Zenith.
Platte 45.



↑
Fig. 3b. Dämmerungsleuchten gegen den
Horizont. Platte 45.

Die Auswertung der Platten erfolgte durch subjektive Betrachtung der photographierten Spektren. Aus dem Intensitätsabfall der *D*-Linien in der Reihe der 7 Spektren läßt sich mit guter Sicherheit diejenige Aufnahme festlegen, während oder nach welcher die *D*-Linien bei Beobachtung während der Abenddämmerung gerade verschwinden bzw. bei Morgendämmerungsaufnahmen gerade auftreten. An Hand der während der Aufnahmen abgelesenen Zeiten wurden dann die jeweiligen Zeitpunkte t_1 und t_2 bestimmt. Diese Zeiten waren bis auf ± 1 min festzulegen. Aus den einzelnen Zeitpaaren t_1 und t_2 wurden dann entsprechend den im Abschnitt 2 gemachten Ausführungen mit den dort angegebenen Beziehungen die jeweiligen Höhen H und a berechnet.

5. Die Meßergebnisse. Da die allgemeine Wetterlage in Braunschweig für Dämmerungs- und Nachthimmelbeobachtungen nicht als besonders ideal anzusprechen ist, mußten für die Aufnahmen Tage ausgesucht bzw. abgewartet werden, welche unter den gegebenen Verhältnissen bezüglich Klarheit und Sicht günstige Bedingungen aufwiesen. Diese Bedingungen waren unbedeckter Himmel — zumindestens in den anvisierten Beobachtungsrichtungen —, dunstfreie Atmosphäre mit guter Sicht und Abwesenheit von störendem Mondlicht. Störungen durch Streulicht von Stadtbeleuchtung usw. waren mit Rücksicht auf die allgemeine Verdunkelung nicht zu befürchten.

Von Mitte Januar 1941 ab wurden zunächst orientierende Dämmerungsaufnahmen gemacht; sie dienten zur Prüfung der gesamten Meßanordnung

sowie zur Festlegung der Belichtungszeiten und der ungefähren Größe der Sonnentiefen $-h_1$ und $-h_2$. Auf Grund dieser Vorversuche, welche das einwandfreie Arbeiten der Apparatur erwiesen, wurde die Aufnahmetechnik

für die eigentlichen Untersuchungen in der im vorigen Abschnitt bereits beschriebenen Weise festgelegt.

In der Fig. 3a und b sind die Platten 46 und 45, welche am 2.6.41 unter den Zenithdistanzen $\zeta = 0$ (Zenith) und $\zeta = 74^\circ 57' 30''$ (Horizont) während der Morgendämmerung aufgenommen wurden, als typische Vertreter der erzielten Ergebnisse reproduziert worden. Die Tabelle 1 enthält die zu den einzelnen Spektren gehörigen Aufnahmezeiten in MEZ. Auf der Platte 46 (Zenithaufnahmen) erscheinen die *D*-Linien mit sichtbarer Intensität im 2. Spektrum, auf der Platte 45 (Horizontaufnahmen) werden die *D*-Linien zwischen dem 2. und 3. Spektrum sichtbar. Aus dem Intensitätsverlauf der *D*-Linien über die einzelnen Spektren und den zugehörigen Belichtungszeiten

Tabelle 1. Belichtungszeiten
der am 2. 6. 1941 während der Morgendämmerung
aufgenommenen Spektren

Platte 46. (Zenith)		Platte 45. (Horizont)	
Spektrum Nr.	Belichtung MEZ	Spektrum Nr.	Belichtung MEZ
1	2.47—2.52	(1)	(2.03—2.07)
2	2.52—2.55	2	2.07—2.11
3	2.55—2.58	3	2.11—2.15
4	2.58—3.01	4	2.15—2.19
5	3.01—3.04	5	2.19—2.23
6	3.04—3.07	6	2.23—2.27
(7)	(2.43—2.47)	7	2.27—2.31

ergibt sich für die Zeitpunkte des Eintauchens der oberen Grenze der leuchtenden Natriumschicht in die anregende Sonnenstrahlung

$$t_1 = 2^{54} \text{ MEZ (Zenith)} \quad (8a)$$

$$t_2 = 2^{11} \text{ MEZ (Horizont)} \quad (8b)$$

Nach Umrechnung dieser Zeitpunkte auf wahre Ortszeit erhält man aus den entsprechenden Stundenwinkeln τ_1 und τ_2 , den zugehörigen Werten

Tabelle 2. Auswertung
der Dämmerungsaufnahmen vom 2. 6. 1941

	t_{12} [MEZ]	τ_{12} [°]	h_{12} [°]	Δh [°]	H [km]	a [km]
Zenith	2 ⁵⁴	140° 24' 30"	— 7° 59' 47"	3° 28' 32"	117,7	54,5
Horizont ..	2 ¹¹	152° 9' 30"	— 11° 28' 19"			

δ_1 und δ_2 für die Sonnendeklationen*) und der geogr. Breite φ über Gleichung (5) die Sonnentiefen $-h_1$ und $-h_2$, bzw. $\Delta h = h_1 - h_2$. Mit dem Erdradius $R = 6370,3$ km folgen dann über die Beziehungen (2) und (4) die beiden Höhenlagen H und a für die Obergrenzen der leuchtenden Natriumschicht und der die anregende Sonnenstrahlung abschirmenden Schicht. Für den

*) Alle astronomischen Daten wurden dem Berliner Astronomischen Jahrbuch für 1941, 166. Jahrgang, Ferd. Dümmler, Bonn und Berlin 1939, entnommen.

4 Wissenschaftl. Abhandl.

2.6.41 sind die entsprechenden Zahlenwerte in der Tabelle 2 zusammengefaßt worden.

Die Tabelle 3 enthält durchnummeriert die Ergebnisse sämtlicher auswertbarer Platten, welche von Februar bis Juni 1941 mit der oben beschriebenen Apparatur aufgenommen wurden. Die 2. Spalte gibt das Aufnahmedatum

Tabelle 3. Meßergebnisse
zur Bestimmung der Obergrenzen der leuchtenden Natriumschicht und der
die anregende Sonnenstrahlung abschirmenden Schicht

Lfd. Nr.	Datum	t_1 [MEZ]	t_2 [MEZ]	H [km]	a [km]	H' [km]	Bemerkungen
1	6.2.41	6 ⁵⁵ (5)	—	—	—	(132,8)	
2	7.2.41	6 ⁵¹ (3)	6 ³⁰ (8)	117,1	31,4	(139,6)	Dämmerungs- aufhellung sehr merklich
3	20.2.41	18 ³⁸ (3)	18 ⁴⁹ (3)	115,7	52,4	117,0	
4	21.2.41	6 ³⁵ (3)	6 ¹⁵ (2)	115,4	54,2	114,8	
5	1.3.41	18 ⁴⁵ (13)	19 ⁵⁵ (3)	(≤113,3)	(≤47,4)	119,7	Nordlicht, Mond
6	14.3.41	—	19 ³¹ (4)	—	—	(139,0)	helle Nacht
7	17.3.41	19 ¹⁴ (5)	19 ³⁸ (4)	135,9	68,0	121,3	
8	18.4.41	20 ¹³ (3)	20 ³⁶ (4)	115,4	52,3	116,8	Zirrocumulus im Zenith
9	21.4.41	20 ¹⁸ (3)	20 ³⁸ (3)	(>92,4)	(>33,8)	112,1	Wolken-in Horizont- nähe
10	12.5.41	20 ⁵⁸ (3)	21 ³⁵ (5)	115,4	57,3	112,1	sehr klare Nacht nach W. und N.
11	13.5.41	21 ⁰⁶ (5)	21 ³⁵ (19)	(>76,1)	(>4,4)	125,9	dunstig
12	21.5.41	—	21 ⁵⁵ (9)	—	—	(133,7)	
13	27.5.41	21 ³⁰ (3)	22 ¹⁶ (4)	132,0	67,1	118,3	sehr klare Nacht (Brockensicht)
14	1.6.41	21 ⁴¹ (3)	22 ²⁶ (8)	120,9	51,7	122,7	klare Nacht, Mond
15	2.6.41	2 ⁵⁰ (3)	2 ¹¹ (4)	117,7	54,5	116,8	wolkenlos, dunstig (?)
16	3.6.41	21 ⁴¹ (3)	22 ²⁵ (4)	116,8	52,1	118,3	sehr klar, im Zenith Mond
17	4.6.41	2 ⁵⁰ (3)	—	—	—	119,2	sehr klar
18	4.6.41	21 ⁴⁵ (3)	22 ³⁸ (4)	123,3	55,0	122,0	klare Nacht, Mond
19	5.6.41	2 ⁴⁷ (3)	2 ⁰⁴ (4)	111,0	42,7	122,0	klare Nacht
20	17.6.41	21 ⁵⁶ (4)	22 ³⁸ (4)	93,9	28,1	119,7	klare Nacht
21	21.6.41	21 ⁵² (3)	22 ³⁵ (3)	107,0	8,1	112,4	Film alt*)

an, Spalte 3 die Zeitpunkte t für das Verschwinden bzw. Auftreten der D -Linien am Dämmerungshimmel im Zenith, Spalte 4 die entsprechenden Zeitpunkte t_2 in horizontaler Richtung ζ ; in Klammern ist hinter den Zeiten t_1 und t_2 jeweils die Belichtungsdauer in min für dasjenige Spektrum hinzugefügt worden, aus welchem die Zeitpunkte t_1 und t_2 bestimmt wurden. Soweit während der gleichen Dämmerung beide Platten diesen Dämmerungseffekt zeigen—Nr. 2—5, 7—11, 13—16, 18—21 — wurden die zugehörigen Höhen H und a nach (2)

*) Am 21.6.41 wurden die Spektren auf einem Agfa-Isopan-Ultra-Film von 23/10° DIN Empfindlichkeit aufgenommen. Nach der Entwicklung zeigte sich, daß der benutzte Film offensichtlich zu lange gelagert hatte. Außerdem ergab sich, daß dieser Film zu grobkörnig ist und flau arbeitet, so daß er nur ungenaue Zeitbestimmungen für die Zeitpunkte t_{12} zuläßt.

und (4) berechnet; diese Zahlenwerte sind in Spalte 5 und 6 eingetragen worden. In Spalte 8 sind Bemerkungen aufgenommen worden, welche bei den einzelnen Aufnahmen vom Beobachter in das Protokollbuch eingetragen wurden und im wesentlichen Angaben über jeweilige Witterungs- bzw. Sichtverhältnisse enthalten, soweit sie wesentlich von denen einer normalen Dämmerungsbeobachtung abweichen.

Die einzelnen Höhenwertepaare wurden in ein H - a -Diagramm eingezeichnet (Fig. 4). Dabei mußten die aus den Aufnahmen vom 1.3., 21.4. und 13.5.41 ermittelten Höhenwerte (Nr. 5, 9 und 11) ausgeschieden werden. Die Zeitwerte t_2 waren aus den an diesen Tagen aufgenommenen Spektren nur als oberer oder unterer Grenzwert bestimmbar, so daß die resultierenden Zahlenwerte für H und a als sehr unsicher anzusehen sind; die Höhenwerte sind entsprechend in der Tabelle 3 eingeklammert worden. Die restlichen 14 Wertepaare (H , a) lassen sich in zwei Gruppen einteilen: einmal eine Gruppe von 8 Wertepaaren (Nr. 3, 4, 8, 10, 14, 15, 16, 18), welche im Diagramm dicht beieinander liegen, und zum anderen 6 Wertepaare (Nr. 2, 7, 13, 19, 20, 21), welche gegenüber dem Schwerpunkt der ersten Gruppe eine größere Streuung aufweisen und im Diagramm jeweils mit ihrer Nr. gekennzeichnet sind. Die Abweichungen dieser 6 Wertepaare vom Schwerpunkt der ersten Gruppe lassen keinen systematischen Gang erkennen, weisen vielmehr eine ziemlich gleichmäßige Streuung auf. Es ist also zunächst nicht anzunehmen, daß die für diese 6 Tage errechneten Höhenwerte tatsächlichen größeren Verschiebungen in der Höhenlage für die beiden Obergrenzen in der Atmosphäre entsprechen; man wird diese Zahlenwerte vielmehr als zufällige Abweichungen werten müssen, welche in verschiedenen Beeinträchtigungen des Meßverfahrens — vor allem wohl für die Horizontbeobachtungen — durch atmosphärische Sichteinflüsse begründet sein können.

Entsprechend wurde die Mittelwertbildung aus diesen 14 Beobachtungen gruppenweise durchgeführt. Die zahlenmäßigen Ergebnisse enthält die Tabelle 4. Während die Mittelwerte H für beide Gruppen unter Berücksichtigung der Fehlergrenzen (siehe Abschnitt 6) als praktisch gleich anzusehen sind, weisen die entsprechenden \bar{a} -Werte eine etwas größere, aber auch noch innerhalb der Fehlergrenzen liegende Abweichung auf. Wie schon oben betont wurde, ist jedoch die Anzahl der bisherigen Beobachtungen für irgendwelche Folgerungen über tatsächliche Verschiebungen der Obergrenze der abschirmenden Schicht noch viel zu gering. Die Gesamtmittelwerte \bar{H} und \bar{a} stimmen wieder mit denen der Gruppe 1 in sehr befriedigender Weise überein.

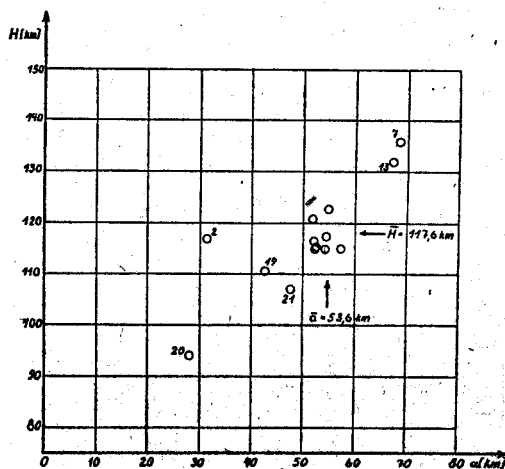


Fig. 4. Höhenwerte H und a aus den Beobachtungsgruppen 1 und 2.

Außer diesen 17 Beobachtungen gegen den Zenith und Horizont, von denen 14 zur Festlegung von Zahlenwerten für H und a führten, enthält die Tabelle 3 noch eine dritte Gruppe von 4 weiteren Beobachtungsergebnissen

Tabelle 4. Mittelwerte
für \bar{H} und \bar{a} aus der Bestimmung von t_1 und t_2

	\bar{H} km	\bar{a} km
Gruppe 1 Nr. 3, 4, 8, 10, 14, 15, 16, 18	117,6	53,6
Gruppe 2 Nr. 2, 7, 13, 19, 20, 21	116,2	47,6
Gruppe 1 und 2 Nr. 2–4, 7, 8, 10, 13–16, 18–21	116,9	51,1

für Tage, an denen nur Aufnahmen gegen den Zenith oder den Horizont auswertbare Spektren, d. h. Werte für den Zeitpunkt t_1 oder t_2 ergaben (Nr. 1, 6, 12, 17). Diese Dämmerungseffektbeobachtungen können folgendermaßen für eine Bestimmung der oberen Grenze H der leuchtenden Natriumschicht herangezogen werden.

Da nur jeweils ein Meßresultat vorliegt, kann von den beiden Unbekannten H und a nur eine unter Vorgabe eines Zahlenwertes für die andere berechnet werden. Zur Festlegung der entsprechenden H -Werte hat man also die Höhe a als \bar{a} aus den Messungen in zwei Beobachtungsrichtungen zu entnehmen. Für \bar{a} wurde die als Mittelwert aus der Gruppe 1 bestimmte Höhe von 53,6 km gewählt. Aus \bar{a} und t_1 bzw. \bar{a} und t_2 ergeben sich dann mit H' bezeichnete Werte für die Obergrenze der leuchtenden Natriumschicht, aus der Beziehung

$$H' = (R + \bar{a}) \cdot \sqrt{1 + 4u} - R. \quad (9)$$

Dabei ist u eine Abkürzung für

$$u = \left[\frac{\sin \frac{h}{2} \cos \left(\zeta - \frac{h}{2} \right)}{\cos(\zeta - h)} \right]^2. \quad (10)$$

Für Zenithbeobachtung ($\zeta = 0$) vereinfacht sich die Gleichung (9) zu

$$H' = \frac{R + \bar{a}}{\cosh h} - R. \quad (9a)$$

Die resultierenden Zahlenwerte sind in die Spalte 7 der Tabelle 3 eingetragen worden. Diese Berechnung wurde nicht nur für die 4 Beobachtungen (Nr. 1, 6, 12, 17) durchgeführt, für welche sie das eigentliche Auswertverfahren darstellt, sondern gleichzeitig auch für die übrigen Beobachtungen zur Kontrolle der inneren Konsistenz dieser Werte und zur Untersuchung der bei diesen vom Mittelwert auftretenden Abweichungen vorgenommen.

Dabei ergibt sich folgendes: Die so berechneten H' -Werte stimmen für die Beobachtungen Nr. 7, 13, 19 der Gruppe 2, welche in ihren H -Werten

stärkere Abweichungen vom Mittelwert H der Gruppe 1 zeigten, nunmehr ziemlich gut überein. Da in die Berechnung von H die Differenz Δh einging (Gleichung (2)!), kann nicht eindeutig entschieden werden, für welche der beiden Zeitpunkte — t_1 oder t_2 — die Aufnahmen während der betreffenden Dämmerung zu ungenauen oder gefälschten Werten geführt haben. U. U. können also auch die Werte für beide Zeitpunkte — t_1 und t_2 — nicht den wahren Verhältnissen entsprechend ermittelt sein. Die bei der Beobachtung Nr. 21 noch verbliebene Abweichung ist wohl durch das Alter des verwendeten Filmmaterials begründet.

Etwas anders liegt der Fall bei der Beobachtung Nr. 2, welche auch der Gruppe 2 zugeordnet wurde und nun in Zusammenhang mit Nr. 1 betrachtet werden soll. Für beide Beobachtungstage folgen unter Benutzung von $\bar{a} = 56,3$ km H' -Werte, welche einmal untereinander übereinstimmend weit über den sonst für H bzw. H' berechneten Höhen liegen; zum anderen sieht man, daß die direkte Auswertung der gemessenen Zeiten t_1 und t_2 für die Beobachtung Nr. 2 zu einer Höhe H von 117,1 km führt, welche bestens mit den Mittelwerten \bar{H} übereinstimmt, während der a -Wert wesentlich kleiner als \bar{a} ausgefallen ist. Da die Beobachtungen Nr. 1 und 2 an zwei aufeinander folgenden Tagen gemacht wurden, ist die Möglichkeit nicht ganz von der Hand zu weisen, daß dieser a -Wert von etwas über 30 km reell ist, d. h. daß die Obergrenze der abschirmenden Schicht an diesen beiden Morgen tatsächlich um etwa 20 km tiefer als sonst üblich gelegen ist. Bei der Mittelwertbildung aus den H' -Werten sollen jedenfalls zunächst die beiden Beobachtungen Nr. 1 und 2 unberücksichtigt bleiben.

Von den restlichen 3 Beobachtungen der 3. Gruppe führt die Beobachtung Nr. 17 als Zenithaufnahme zu einer mit den Mittelwerten H gut übereinstimmenden Höhe H' , während die H' -Werte aus den beiden Horizontbeobachtungen Nr. 6 und 12 wesentlich höher liegen. Da von vornherein wegen der stärkeren Auswirkung des Spaltwinkelbereichs $\Delta\zeta$ (siehe Abschnitt 6) und der meist schlechteren Sichtverhältnisse in Horizontnähe für Horizontbeobachtungen mit stärkeren Störeinflüssen auf die Meßergebnisse zu rechnen ist, sollen auch die Beobachtungen Nr. 6 und 12 bei einer Mittelwertbildung fortgelassen werden. Entsprechend sind die H' -Werte für Nr. 1, 2, 6, 12 in der Tabelle 3 eingeklammert worden.

Bildet man nun aus den 17 übrigbleibenden H' -Werten (Nr. 3—5, 7—11, 13—21) der Tabelle 3 das arithmetische Mittel, so folgt $H' = 118,3$ km, ein Wert, welcher mit dem Mittelwert \bar{H} der Gruppen 1 und 2 sehr gut übereinstimmt*). In der Fig. 5 sind diese 17 H' -Werte wieder in ein H' - a -Diagramm eingetragen worden; dabei sind die H' -Werte über der Abszisse $a = \bar{a} = 53,6$ km durch Querstriche dargestellt, deren Länge der Zahl der jeweiligen H' -Werte proportional ist. Aus der Fig. 5 ist wieder die ziemlich gleichmäßige Streuung der H' -Werte zum H' ersichtlich.

Somit ist als Gesamtergebnis aus den von Februar bis Juni 1941 in Braunschweig gewonnenen Dämmerungsaufnahmen festzustellen, daß sich für die

*) Nimmt man bei dieser Mittelwertbildung zu diesen 17 H' -Werten noch die Beobachtungen Nr. 1 und 2 hinzu, so ergibt sich $H' = 120,3$ km; bei Berücksichtigung aller 21 Beobachtungen würde $H' = 121,8$ km folgen.

obere Grenze H der leuchtenden Natriumschicht und die Obergrenze a der die anregende Sonnenstrahlung abschirmenden Schicht

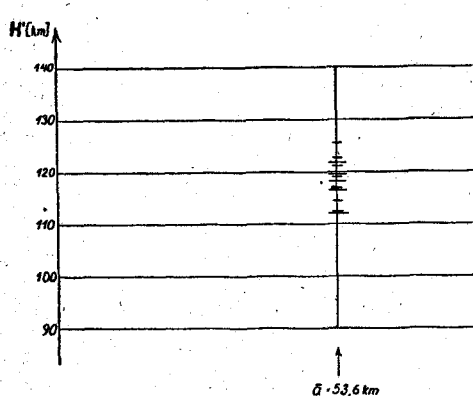


Fig. 5. Höhenwerte H' aus den Beobachtungsgruppen 1 bis 3 unter Vorgabe von $\bar{a} = 53,6$ km.

$$\bar{H} = 118 \text{ km} \quad (11)$$

und $\bar{a} = 54 \text{ km} \quad (12)$

als Mittelwerte ergeben. Die diesen Mittelwerten entsprechenden mittleren Sonnenhöhen \bar{h}_1 und \bar{h}_2 sind

$$\bar{h}_1 = -8^\circ 4' 45'' \quad (13a)$$

$$\bar{h}_2 = -11^\circ 22' 58'' \quad (13b)$$

bzw.

$$\bar{h} = \bar{h}_1 - \bar{h}_2 = 3^\circ 18' 13'' \quad (13c)$$

Falls die leuchtende Natriumschicht auch nach unten einigermaßen scharf begrenzt wäre, sollte sich eine solche untere Grenze gleich-

falls im Intensitätsverlauf des Natriumdämmerungsleuchtens bemerkbar machen, wie schon in der vorausgehenden Veröffentlichung⁵⁾ an Hand der dortigen Fig. 1 und 2 im einzelnen auseinandergesetzt wurde.

Während der Abenddämmerung wäre dann anstatt einer allmählich einsetzenden und stetig verlaufenden Intensitätsabnahme der D -Linien-Emission vom Tag- zum Nachtwert im Intensitätsverlauf ein plötzlich auftretender Knick mit anschließend steilem Abfall in dem Zeitmoment zu erwarten, zu welchem die untere Grenze der leuchtenden Natriumschicht in den Schatten der abschirmenden Schicht eintritt. Ein derartiger Effekt ist aus den Bernardschen Beobachtungen²⁾ tatsächlich deutlich abzulesen; aus dem Zeitpunkt für das Auftreten dieser knickartigen Unstetigkeit in der Intensitätskurve konnten die Verfasser die Höhe der unteren Grenze und damit die Dicke der leuchtenden Natriumschicht für die Bernardsche Dämmerungsbeobachtung bestimmen⁶⁾. Dabei zeigte sich, daß der Einsatz des Intensitätsabfalles bei der Bernardschen Beobachtung weicher verlief als das Einmünden der Kurve in den endgültigen Nachtwert; hieraus war zu schließen, daß die untere Grenze weniger scharf definiert war als die Obergrenze der leuchtenden Natriumschicht.

Wie schon im Zusammenhang mit der Bernardschen Intensitätskurve betont wurde, ist die Bestimmung der unteren Grenze wahrscheinlich wesentlich unsicherer als die Festlegung der oberen Grenze. Beim Einsetzen des Intensitätsabfalles sind kleine Änderungen der ursprünglich vorhandenen Intensität wesentlich schwieriger eindeutig festzulegen als das Verschwinden der Intensität bei Eintauchen der gesamten leuchtenden Schicht in den Schatten der abschirmenden Schicht. Diese Schwierigkeit wird durch den Umstand vergrößert, daß der Einsatz im Intensitätsabfall — d.h. das Eintauchen der unteren Grenze der leuchtenden Natriumschicht in den Schatten — zu Zeitpunkten erfolgt, bei denen die Gesamthelligkeit des Dämmerungshimmels noch wesentlich größer ist, was sich in einem verstärkt auftretenden Kontinuum beiderseits der D -Linien äußert.

Da die in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Untersuchungen in erster Linie auf die Bestimmung der oberen Grenze zugeschnitten waren, konnten auch nur 3 für die Bestimmung einer unteren Grenze auswertbare Beobachtungen gemacht werden, welche in der Tabelle 5 zusammengestellt worden sind. Die für die untere Grenze berechneten Größen sind durch einen Stern (*) von den für die obere Grenze geltenden unterschieden worden. Die vorletzte Spalte der Tabelle 5 enthält nochmals die für die obere Grenze H berechneten und schon in Tabelle 3 eingetragenen Zahlenwerte. In der letzten Spalte ist die Differenz $d = H - H^*$, d.h. die Dicke der leuchtenden Natriumschicht eingetragen. Für diese ergibt sich aus der Beobachtung Nr. 1* ein Wert von 12,7 km, wobei zu betonen ist, daß die Beobachtungen vom 6.2.41 weniger sicher erscheinen müssen, wie schon oben ausgeführt wurde. Da die Beob-

Tabelle 5. Meßergebnisse
zur Bestimmung der unteren Grenze und der Dicke der leuchtenden
Natriumschicht

Lfd. Nr.	Datum	t_1^* [MEZ]	t_2^* [MEZ]	h_1^* [°]	h_2^* [°]	a [km]	\bar{a} [km]	H^* [km]	H [km]	d [km]
1*	6.2.41	7 ⁰⁰ (5)	—	—8° 12' 28"	—	—	53,6	120,1	(132,8)	12,7
2*	20.2.41	18 ²³ (3)	18 ⁴³ (3)	—7° 15' 9"	—7° 12' 51"	52,4	53,3	104,6	115,6	11,0
3*	21.2.41	6 ⁴⁰ (2)	6 ²⁰ (4)	—7° 10' 32"	—7° 12' 51"	54,2	53,3	104,6	115,6	11,0

achtungen Nr. 2* und 3* während zweier direkt aufeinander folgender Dämmerungen, zwischen denen nur die Nacht vom 20./21. 2. 41 lag, gewonnen wurden, erfolgte ihre Auswertung durch Mittelwertbildung aus den bestimmten Einzelwerten für h^* und H gemäß Formel (9a); für die Schichtdicke folgt $d = 11,0$ km. Trotz der oben betonten Unsicherheit dieser Messungen stimmen die beiden Zahlenwerte für die Schichtdicke befriedigend innerhalb der im folgenden Abschnitt abgeschätzten Fehlergrenzen überein.

Als Mittelwert aus diesen beiden Bestimmungen folgt für die Dicke der leuchtenden Natriumschicht

$$d = 11,5 \text{ km}, \quad (14)$$

und somit für die Höhe der unteren Grenze als Differenz aus H und d

$$H^* = 106,5 \text{ km}. \quad (15)$$

6. Die Meßgenauigkeiten. Ehe die soeben mitgeteilten Ergebnisse in Zusammenhang mit allgemeinen Problemen der höheren Atmosphäre diskutiert werden, seien hier noch einige Angaben über die Meßgenauigkeit gemacht.

Die Fehlerdiskussion ist für die vorliegenden Untersuchungen in zwei verschiedene Gruppen aufzuteilen: einmal Ungenauigkeiten, welche durch die benutzte Apparatur bedingt und als Fehlergrenzen zahlenmäßig abzuschätzen sind, und weiter Fehlermöglichkeiten, welche sich aus wechselnden bzw. nicht ausreichenden Witterungs- bzw. Sichtverhältnissen der Atmosphäre ergeben und quantitativ nicht erfaßt werden können.

Die apparativen Fehlerquellen liegen in dem durch die endliche Spaltbreite bei den Aufnahmen überdeckten Winkelbereich $\Delta\zeta$ des Dämmerungshimmels, Unsicherheiten in der Richtungsjustierung des Spektographen auf

den Himmel und der Unsicherheit in der Festlegung der Zeitpunkte t_1 und t_2 aus den photographierten Spektren.

Zunächst soll der Einfluß des Winkelbereichs $\Delta\zeta$ auf die Höhenbestimmung abgeschätzt werden. Hierzu sind die diesem Winkelbereich entsprechenden Unsicherheitsspannen $\Delta_\zeta(h_1)$ bzw. $\Delta_\zeta(h_2)$ in der Bestimmung der Sonnenhöhen h_1 bzw. h_2 zu berechnen und hieraus für das Beispiel des 2. 6. 41 die entsprechenden Fehler $\Delta_\zeta t_1$ bzw. $\Delta\tau t_2$ in der Festlegung der Zeitpunkte t_1 bzw. t_2 . Aus der

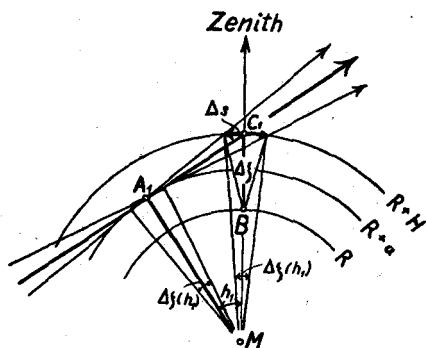


Fig. 6a: Schematische Darstellung zur Bestimmung des aus der endlichen Spaltenbreite resultierenden Fehlers für Zenithbeobachtung.

(Die einzelnen Höhen sind nicht maßstäblich gezeichnet).

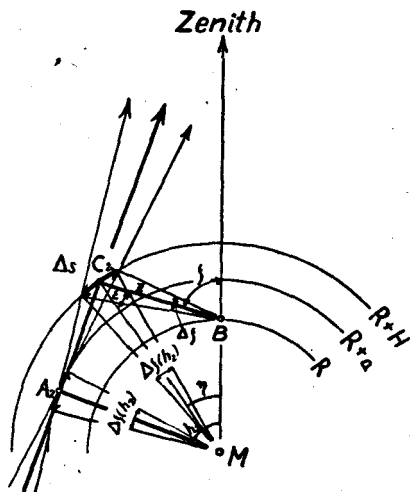


Fig. 6b: Schematische Darstellung zur Bestimmung des aus der endlichen Spaltenbreite resultierenden Fehlers für Horizontbeobachtung.

Fig. 6a wird die Berechnung von $\Delta_\zeta(h_1)$ (Zenithbeobachtung) und aus Fig. 6b die Bestimmung von $\Delta_\zeta(h_2)$ (Horizontbeobachtung) ersichtlich. Für das dem Winkelbereich $\Delta\zeta$ in der Höhe H über dem Beobachter entsprechende Bogenstück Δs gilt bei Zenithbeobachtung (Fig. 6a)

$$\Delta s = (R + H) \cdot \Delta_\zeta(h_1) = H \cdot \Delta\zeta, \quad (16)$$

woraus für $\Delta_\zeta(h_1)$

$$\Delta_\zeta(h_1) = \frac{H}{R + H} \cdot \Delta\zeta \quad (17)$$

folgt, Analog ergibt sich für Horizontbeobachtung (Fig. 6b)

$$\Delta s = (R + H) \cdot \Delta_\zeta(h_2) = \frac{z \cdot \Delta\zeta}{\cos \varepsilon}, \quad (18)$$

woraus für $\Delta_\zeta(h_2)$

$$\Delta_\zeta(h_2) = \frac{z}{R + H} \cdot \frac{1}{\cos \varepsilon} \cdot \Delta\zeta = \frac{\sin \eta}{\sin \zeta \cdot \cos \varepsilon} \Delta\zeta \quad (19)$$

folgt. Dabei berechnen sich ε und η aus dem Dreieck \overline{MCB} zu

$$\varepsilon = \arcsin \left(\sin \zeta \cdot \frac{R}{R + H} \right) \quad (20a)$$

$$\text{und} \quad \eta = \zeta - \varepsilon. \quad (20b)$$

Zur zahlenmäßigen Berechnung werden die Mittelwerte \bar{H} und \bar{a} , als Fehlergrenze $\pm \frac{\Delta\zeta}{2}$ die Hälfte des schon in Abschnitt 3 berechneten Winkelbereichs $\Delta\zeta = 16,11'$ und für ζ als Mittelwert aus den beiden benutzten Richtungen $\bar{\zeta} = 74^\circ$ benutzt. Dann ergibt sich

$$\Delta_{\zeta}(h_1) = \pm 0,0182 \cdot \frac{\Delta\zeta}{2} = \pm 0,147' = \pm 8,8'', \quad (17a)$$

$$\Delta_{\zeta}(h_2) = \pm 0,181 \cdot \frac{\Delta\zeta}{2} = \pm 1,461'. \quad (19a)$$

Der Fehler durch die endliche Spaltbreite wirkt sich also in der Bestimmung der Sonnenhöhe am Horizont etwa 10mal stärker aus als im Zenith. Dabei sind die Werte $\Delta_{\zeta}(h)$ unabhängig vom Beobachtungsort und der Jahreszeit. Aus Gleichung (5) folgt dann für die Ungenauigkeiten in der Festlegung der Zeiten t_1 und t_2

$$\left| \Delta_{\zeta} t_{[\text{min}]} \right| = \frac{\cos h}{15 \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \sin \tau} \Delta_{\zeta}(h) [\tau] \quad (21)$$

erfordert also zur zahlenmäßigen Berechnung die Kenntnis von Sonnen-deklination und Stundenwinkel zur Zeit t_1 bzw. t_2 . Dieser Fehler $\Delta_{\zeta} t$ ist demnach — im Gegensatz zu $\Delta_{\zeta}(h)$ — abhängig vom Beobachtungstag und schwankt in seiner Größe mit der Jahreszeit entsprechend der Geschwindigkeit, mit welcher sich die Schattengrenze am Himmel bewegt.

Zunächst sollen $\Delta_{\zeta} t_1$ und $\Delta_{\zeta} t_2$ wieder für den 2.6.41 berechnet werden. Zu diesem Zweck wurden aus den Mittelwerten \bar{H} und \bar{a} der Gruppe 1 bzw. den zugehörigen Sonnentiefen $-\bar{h}_1$ und $-\bar{h}_2$ die Zeiten \bar{t}_1 und \bar{t}_2 zurückgerechnet, zu denen entsprechend diesen Mittelwerten der Dämmerungseffekt im Zenith und in ζ -Richtung am 2.6.41 in Braunschweig hätte beobachtet werden müssen. Diese Zeiten, sowie die zugehörigen Stundenwinkel $\bar{\tau}_{12}$ enthält Tab. 6, welche ganz der Tab. 2 entspricht, nur von rechts nach links zu lesen wäre. Mit diesen Zahlenwerten, den entsprechenden Werten δ_1 und δ_2 für die Sonnen-deklination.

Tabelle 6. Mittlere Dämmerungseffektdaten
für den 2. 6. 1941

	\bar{t}_{12} [MEZ]	$\bar{\tau}_{12}$ [°]	\bar{h}_{12} [°]	\bar{H} [km]	\bar{a} [km]
Zenith . .	253,1	140° 38' 12"	— 8° 4' 45"	118,0	53,6
Horizont	212,3	150° 50' 21"	— 11° 22' 58"		

und der geographischen Breite φ ergibt sich aus $\Delta_{\zeta}(h_1)$ bzw. $\Delta_{\zeta}(h_2)$ nach Gleichung (21)

$$\Delta_{\zeta} t_1 = \pm 0,027 \text{ min} \quad (21a)$$

$$\Delta_{\zeta} t_2 = \pm 0,346 \text{ min} \quad (21b)$$

Diese Zahlen zeigen also, daß der Fehler durch die endliche Spaltbreite gegenüber der Unsicherheit in der Festlegung der Zeiten t_1 und t_2 aus den fotografierten Spektren, für welche eine Fehlergrenze $\Delta_c t_2 = \pm 1$ min angesetzt wurde, nicht wesentlich ins Gewicht fällt. In den Monaten Februar bis Mai ist der Fehler $\Delta_c t$ noch kleiner im Vergleich zu dem für die ganze Beobachtungsperiode konstant mit ± 1 min angesetzten Fehler $\Delta_a t$ (siehe Tab. 7). Die Spaltbreite war also, wie schon in Abschnitt 3 ausgeführt wurde, den experimentellen Verhältnissen weitgehend angepaßt gewählt.

Entsprechend den Angaben in Abschnitt 4 wurde die Einrichtung der gesamten Meßanordnung auf die beiden Beobachtungsrichtungen mit einer solchen Genauigkeit durchgeführt, daß die dieser Justierung anhaftenden Fehler um etwa eine Größenordnung unter dem durch die endliche Spaltbreite bedingten Fehler bleiben und somit für die weitere Fehlerdiskussion außer Betracht bleiben können.

Es sollen nun die für die Höhenbestimmungen aus den beiden Fehlermöglichkeiten $\Delta_c(h)$ bzw. $\Delta_c t$ und $\Delta_a(h)$ bzw. $\Delta_a t$ resultierenden Gesamtfehler ΔH und Δa zahlenmäßig angegeben werden. Für ΔH und Δa folgt aus den Gleichungen (1) bzw. (4)

$$\Delta H = \frac{\pi \cdot \cos(\zeta - \Delta h)}{1,08 \cdot 10^4 \cdot \sin \zeta} \frac{(R + H)^2}{R} \cdot \Delta(\Delta h)_{[1]}, \quad (22)$$

bzw.

$$\Delta a = \frac{\pi(R + H)}{1,08 \cdot 10^4} \left[\frac{\cos(\zeta - \Delta h)}{\sin \zeta} \cdot \frac{R + H}{R} \cos |h_1| \cdot \Delta(\Delta h)_{[1]} + \sin |h_1| \cdot \Delta(h_1)_{[1]} \right], \quad (23)$$

wobei alle Längen in km einzusetzen und unter $\Delta(h_1)$ bzw. $\Delta(\Delta h)$ die Gesamtfehler in Bogenminuten zu verstehen sind, welche sich aus den Beziehungen

$$\Delta(h_1) = \Delta_a(h_1) + \Delta_c(h_1), \quad (24)$$

$$\Delta(h_2) = \Delta_a(h_2) + \Delta_c(h_2), \quad (25)$$

$$\Delta(\Delta h) = \sqrt{\Delta^2(h_1) + \Delta^2(h_2)^*}, \quad (26)$$

ergeben. Während $\Delta_c(h)$ von der Jahreszeit unabhängig ist und die Werte (17a) und (19a) besitzt, berechnet sich $\Delta_a(h)$ für konstantes $\Delta_a t$ aus der Gleichung

$$\Delta_a(h)_{[1]} = \frac{15 \cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \sin \tau}{\cos h} \cdot \Delta_a t_{[\text{min}]}. \quad (27)$$

Zahlenmäßig würde für den 2.6.41 zu schreiben sein

$$\Delta(h_1) = \pm 5,44' \pm 0,15' = \pm 5,59', \quad (24a)$$

$$\Delta(h_2) = \pm 4,23' \pm 1,46' = \pm 5,69', \quad (25a)$$

$$\Delta(\Delta h) = \pm 7,98', \quad (26a)$$

* Da die beiden Höhen H und a nicht in voneinander unabhängiger Weise aus den beiden gemessenen Zeiten t_1 und t_2 bzw. den entsprechenden Sonnenhöhen h_1 und h_2 berechnet werden, sondern in die Formeln (2) und (4) nur eine Sonnenhöhe h_1 und die Differenz beider $\Delta h = h_1 - h_2$ eingeht, erscheint es angebracht, den Fehler $\Delta(\Delta h)$ nicht additiv aus den beiden Einzelfehlern $\Delta(h_1)$ und $\Delta(h_2)$ zusammenzusetzen, sondern für $\Delta(\Delta h)$ die Wurzel aus der Quadratsumme für die beiden Fehlergrenzen $\Delta(h_1)$ und $\Delta(h_2)$ anzusetzen.

$$\text{bzw.} \quad \Delta t_1 = \Delta t_1 + \Delta a t_1 = \pm 1,027 \text{ min}, \quad (28a)$$

$$\Delta t_2 = \Delta t_2 \pm \Delta a t_2 = \pm 1,346 \text{ min}. \quad (28b)$$

Damit erhält man entsprechend Gleichung (22) und (23) unter Einsetzen des Mittelwertes \bar{H}

$$\Delta H = \pm 5,27 \text{ km}, \quad (22a)$$

$$\Delta a = \pm 6,71 \text{ km}. \quad (23a)$$

Wie schon oben betont, sind die Absolutgrößen dieser Fehler ΔH und Δa jahreszeitlich verschieden, da die Wanderungsgeschwindigkeit der Schattengrenze am Himmel implizit in den bei der Fehlerberechnung benutzten Formeln enthalten ist. Um einen Überblick über den Verlauf der Fehler über den

Tabelle 7. Fehlerberechnung
für verschiedene Tage während der Beobachtungsperiode

Datum	$\Delta a(h_1)$ [']	$\Delta a(h_2)$ [']	$\Delta(h_1)$ [']	$\Delta(h_2)$ [']	$\Delta(\Delta h)$ [']	ΔH [km]	Δa [km]
6.2.41	$\pm 8,85$	$\pm 9,01$	$\pm 9,00$	$\pm 10,47$	$\pm 13,81$	$\pm 9,13$	$\pm 12,21$
21.3.41	$\pm 9,02$	$\pm 8,85$	$\pm 9,17$	$\pm 10,32$	$\pm 13,80$	$\pm 9,13$	$\pm 11,47$
2.5.41	$\pm 7,22$	$\pm 6,57$	$\pm 7,37$	$\pm 8,03$	$\pm 10,90$	$\pm 7,21$	$\pm 9,09$
2.6.41	$\pm 5,44$	$\pm 4,23$	$\pm 5,59^*$	$\pm 5,69$	$\pm 7,98$	$\pm 5,27$	$\pm 6,71$
21.6.41	$\pm 4,99$	$\pm 3,53$	$\pm 5,13$	$\pm 5,00$	$\pm 7,16$	$\pm 4,74$	$\pm 6,05$

untersuchten Jahresbereich für gleiche Fehler $\frac{\Delta \zeta}{2} = \pm 8,06' - \text{d.h. } \Delta(h_1) = \pm 0,15'$ und $\Delta(h_2) = \pm 1,46' - \text{und } \Delta a t_2 = \pm 1 \text{ min}$ zu gewinnen, wurden die resultierenden Fehler für verschiedene Tage entsprechend der gerade für den 2.6.41 skizzierten Fehlerrechnung berechnet. Die zahlenmäßigen Ergebnisse sind in der Tab. 7 zusammengefaßt worden. Wie diese Tabelle zeigt, nehmen im Juni entsprechend dem langsameren Wandern der Schattengrenze die $\Delta a(h)$ -Werte — besonders bei schräger Beobachtung — stark ab. Analog fallen die für die Höhen H und a berechneten Fehlergrenzen für die Sommerbeobachtungen kleiner aus, als sie sich im Winter und Frühjahr ergeben.

Als weiterer Punkt wäre der Einfluß der atmosphärischen Sichtverhältnisse auf die Meßgenauigkeit zu diskutieren. Quantitative Angaben lassen sich bisher mangels entsprechender Messungen hierüber nicht machen. Für eine zahlenmäßige Festlegung wären z.B. gleichzeitige Beobachtungen am Dämmerungshimmel von verschiedenen, hinreichend entfernt voneinander liegenden Bodenstationen aus erforderlich, aus deren Ergebnissen man dann eingehende Schlüsse auf die jeweilige Beeinflussung der gemessenen Intensitäten durch wechselnde Sichtbeschränkung in der Atmosphäre ziehen könnte. Zunächst läge die Vermutung nahe, daß die Beobachtungen in horizontnahen Richtungen besonders starken Störungen unterworfen sind, da das Dämmerungslicht aus diesen Himmelsrichtungen größere Wegstrecken in etwa vorhandenen Dunstschichten durchlaufen muß, als das aus dem Zenith senkrecht einfallende Licht. Eine Intensitätsschwächung durch Dunstextinktion bei schräger Beobachtung wird aber offensichtlich dadurch wieder wettgemacht, daß die leuchtende Natriumschicht auch schräg anvisiert wird und

somit das Leuchten aus einer entsprechend größeren Tiefe der emittierenden Natriumatome auf der Photoplatte zur Wirkung kommt.

Die bislang gewonnenen Ergebnisse zeigen jedenfalls, daß eine wechselnde Lichtschwächung atmosphärischen Dunst die Beobachtungen nur ganz unwesentlich beeinflussen kann. Trotzdem die einzelnen Aufnahmen unter den verschiedensten Sichtbedingungen (siehe Spalte 8 der Tab. 31) gemacht wurden, führt die Auswertung der Platten zu guten Mittelwerten für die zu bestimmenden Höhenlagen H und a mit einer relativ geringen Streuung um dieselben. Unter diesen Umständen glauben die Verfasser nicht, die aus den apparativen Gegebenheiten folgende Fehlergrenze Δa_t in der Zeitbestimmung wegen etwaiger atmosphärischer Störungen wesentlich erhöhen zu müssen.

Demnach wäre an Hand der in der Tab. 7 angegebenen Fehlergrenzen der Fehler für die einzelne Beobachtung sowie der Fehler der Mittelwerte festzulegen. Mit Rücksicht auf die bisher relativ geringe Anzahl von vorliegenden Einzelmessungen wird von einer Gewichtsuteilung für die einzelnen Meßergebnisse — etwa entsprechend den in Abhängigkeit von der Jahreszeit berechneten Fehlern für die Einzelbeobachtung — abgesehen. Ebenso erschien eine gewichtete Mittelwertbildung nach Methoden der Ausgleichrechnung, welche ihrem Wesen nach für Beobachtungen mit rein zufälligen Fehlern entwickelt wurden und auf konstante bzw. systematische Fehler nicht ohne weiteres anwendbar sind⁹⁾, für die vorliegenden Untersuchungen nicht geeignet. Die Anwendung derartiger Mittelwerts- und Fehlerbestimmungen könnte erst ins Auge gefaßt werden, wenn unter ausgesprochen guten und gleichmäßigen Bedingungen regelmäßig morgens und abends Dämmerungsbeobachtungen über längere Zeiträume durchgeführt werden.

Als mittlerer Fehler für die Höhenbestimmungen aus einer Einzelmessung erscheinen die Fehlergrenzen

$$\Delta H = \pm 7 \text{ km}$$

und

$$\Delta a = \pm 9 \text{ km}$$

angemessen. Aus den vorliegenden Meßergebnissen schätzen die Verfasser die Fehlergrenzen der bestimmten Mittelwerte \bar{H} und \bar{a} zu $\Delta \bar{H} = \pm 2,5 \text{ km}$ und $\Delta \bar{a} = \pm 3,0 \text{ km}$ ab*), so daß das Ergebnis der Untersuchungen zu schreiben ist als

$$H = 118 \pm 2,5 \text{ km} \quad (11a)$$

und

$$\bar{a} = 54 \pm 3,0 \text{ km}. \quad (12a)$$

Zu einer Fehlerabschätzung für die Dicke d der leuchtenden Natriumschicht, welche über die Höhe H^* der unteren Grenze nach Beziehung (9a) berechnet wurde, gelangt man über die entsprechende Fehlergleichung

$$\Delta H^* = \frac{1}{\cos h_1} \left[\frac{\pi(R+a) \operatorname{tg} |h_1|}{1,08 \cdot 10^4} \cdot \Delta(h_1)_{[r]} + \Delta \bar{a} \right]. \quad (31)$$

$\Delta(h_1)$ ist wieder aus den Formeln (24), (25) und (27) zu berechnen, wobei unter Berücksichtigung der jeweiligen Aufnahmen und Belichtungszeiten Δa_t für den 6.2.41 mit $\pm 2 \text{ min}$ und für den 20./21.2.41 mit $\pm 1 \text{ min}$ eingesetzt wurde. Die restlichen eingehenden Zahlenwerte sind der Tab. 5 zu entnehmen.

*) Dieser Wert entspricht übrigens auch der Tatsache, daß 8 Beobachtungen der Gruppe 1 vorliegen.

nehmen. Für $\Delta \bar{a}$ wurde einheitlich die oben zu ± 3 km abgeschätzte Fehlergrenze benutzt. Da die Berechnung der beiden Höhen H und H^* selbst, so-

Tabelle 8. Fehlerberechnung
für die untere Grenze und Dicke der leuchtenden
Natriumschicht

Datum	$\Delta a(h_1)$ [']	$\Delta(h_1)$ [']	ΔH^* [km]	Δd [km]
6.2.41	$\pm 17,72$	$\pm 17,87$	$\pm 7,90$	$\pm 8,28$
20./21.2.41	$\pm 9,08$	$\pm 9,23$	$\pm 5,22$	$\pm 5,62$

wie ihrer Fehlergrenzen über die abschirmende Höhe \bar{a} gekoppelt ist, wird für den Fehler in der Dicke angesetzt

$$\Delta d = \sqrt{\Delta^2 H + \Delta^2 H^*}. \quad (32)$$

Die rechnerischen Ergebnisse enthält Tab. 8. Für das oben angegebene Mittel (14) aus den beiden Dickenbestimmungen schätzen die Verfasser als Fehlergrenze einen Wert von $\pm 6,5$ km ab, so daß für die Dicke der leuchtenden Natriumschicht aus den drei vorliegenden Beobachtungen zu schreiben wäre

$$d = 11,5 \pm 6,5 \text{ km}. \quad (14a)$$

Entsprechend führen die gleichen drei Beobachtungen zu einer mittleren Höhe für die untere Grenze der leuchtenden Natriumschicht von

$$H = 106,5 \pm 6 \text{ km}. \quad (15a)$$

7. Vergleich mit anderen Bearbeitungen. Es sollen hier auch die in Braunschweig erzielten Resultate mit denen anderer Autoren zusammengestellt werden.

Vegard und Tønsberg¹⁴⁾ erhielten mit einem rechnerisch-graphischen Auswertverfahren aus ihren 1939 in Oslo und Tromsø angestellten Beobachtungen als Mittelwerte der beiden Höhenlagen $\bar{H} = 116$ km und $\bar{a} = 56$ km. Irgendwelche näheren Angaben über die von ihnen erreichte Meßgenauigkeit enthält die Veröffentlichung nicht.

Penndorf⁸⁾ hat nach von ihm abgeleiteten Formeln eine neue Auswertung der Meßergebnisse von Vegard und Tønsberg vorgenommen. Er kommt dabei zu dem Resultat, daß die Obergrenze der Natriumschicht in Oslo und Tromsø in 110 km Höhe gelegen habe; dabei legt Penndorf als abschirmende Ozon-Obergrenze eine Höhe von 50 km zugrunde, die er als „Ozon-schatten“ aus anderen Überlegungen herleitet. Die sich nach den Penndorf-schen Rechnungen aus den Messungen von Vegard und Tønsberg ergebenden abschirmenden Ozongrenzen streuen um erhebliche Beträge um den von ihm angenommenen Wert von 50 km. Penndorf schließt daraufhin die Mehrzahl dieser so berechneten Ozonhöhen als „ungeeignet“ aus. Dieses Verfahren erscheint bedenklich, zumal Penndorf an der Durchführung der Messungen selbst nicht teilgenommen hat und ihm möglicherweise auch die verschiedenen Beobachtungsdetails (Sicht, Dunst usw.) aus den Meßprotokollen nicht vorgelegen haben. Es ist nämlich, wie schon oben betont wurde, aus den bislang

vorliegenden Meßergebnissen noch nicht eindeutig zu entscheiden, ob es sich bei solchen Streuungen in den beobachteten Ozonhöhen um einen reellen Effekt oder um durch das Meßverfahren bedingte Unsicherheiten handelt. Die in Braunschweig durchgeführten Messungen weisen offensichtlich bzgl. der beobachteten Höhen eine geringere Streuung auf; hieraus kann man wohl nur schließen, daß entweder die evtl. tatsächlich vorhandenen Schwankungen in der Ozonhöhe 1941 über Braunschweig geringer waren als 1939 über Oslo und Tromsø, oder daß den Braunschweiger Messungen geringere Unsicherheiten anhaften als den in Norwegen angestellten Beobachtungen.

In einer neueren Veröffentlichung teilt Vegard¹²⁾ als Gesamtmittel aus den 1939 mit Tønsberg und 1942 bis 1943 mit Kvifte¹³⁾ durchgeführten und in ähnlich dem hier benutzten Verfahren ausgewerteten Messungen $\bar{a} = 49$ km und $\bar{H} = 110$ km mit.

Bernard²⁾ hatte im November 1937 in Tromsø den Dämmerungseffekt der Na-D-Linien nur im Zenith beobachtet, so daß diese Aufnahmen lediglich eine Bestimmung der Obergrenze H der leuchtenden Natriumschicht unter Vorgabe der Abschirmungshöhe a zulassen. Für die obere Grenze der leuchtenden Natriumschicht folgt dann aus dem von Bernard bestimmten Zeitpunkt t_1 nach Gleichung (9a), wenn man die von Vegard und Tønsberg bzw. den Verfassern gemessenen \bar{a} -Werte einsetzt,

$$H \doteq 119 \text{ km für } \bar{a} = 56 \text{ km} \quad (32a)$$

$$H = 117 \text{ km für } \bar{a} = 54 \text{ km.} \quad (32b)$$

In der Tab. 9 sind sämtliche Meßresultate für die oberen Grenzen zusammengefaßt worden. Die Übereinstimmung der in den verschiedenen Jahren,

Tabelle 9. Zusammenstellung
der bisher aus dem Dämmerungsleuchten bestimmten oberen Schichtgrenzen

Autor	Beobachtungs-		\bar{a}	\bar{H}	Bemerkungen
	ort	jahr	km	km	
Bernard	Tromsø	1937	—	113	für $\bar{a} = 50$ km für $\bar{a} = 54$ km
"	"	"	—	117	
Vegard-Tønsberg	Oslo	1939	58	119	
"	Tromsø	1939	50	109	
Cario-Stille	Braunschweig	1941	54 ± 3	$18 \pm 2,5$	
Vegard-Kvifte	Oslo	1942/43	46,8	108,3	
"	"	1943	40,5	102,5	

an verschiedenen Beobachtungsorten und mit verschiedenen Apparaten bestimmten Höhen ist gut.

Selbstverständlich sind diese Zahlen nur als Mittelwerte anzusprechen und schließen nicht aus, daß etwa spontane oder auch periodische Schwankungen in der Höhenlage der leuchtenden Natriumschicht oder der die anregende Sonnenstrahlung abschirmenden Schicht auftreten können. Zu einer Entscheidung dieser Frage sind jedoch sehr regelmäßige und über lange Zeiträume an möglichst vielen Beobachtungsorten durchzuführende Dämmerungsbeobachtungen erforderlich; dabei sollten die benutzten Spektrographen auch in ihrem Aufbau und in ihrer Lichtstärke weitgehendst übereinstimmen und bei gleicher oder möglichst größerer Dispersion ein noch höheres zeitliches

Auflösungsvermögen für die Plattenauswertung garantieren. Erst ein großes und zusammenarbeitendes Netz von Beobachtungsstationen an Punkten günstiger atmosphärischer Bedingungen kann über die Struktur und Lage der Schichtgrenzen, sowie evtl. auftretende Höhenverschiebungen und die aus diesen zu folgernden Konsequenzen für den Anregungsmechanismus und den physikalischen Zustand in der Natriumschicht und der abschirmenden Schicht Aufschluß geben.

Die Tatsache einer experimentell bestimmten Obergrenze für die Abschirmung der die *D*-Linien-Emission anregenden Sonnenstrahlung zwingt zu dem Schluß, daß das Natriumdämmerungsleuchten nicht als Resonanzfluoreszenz, sondern als Photolumineszenz durch ultraviolettes Sonnenlicht zu deuten ist. Die diese Sonnenstrahlung abschirmende Höhe a ergibt sich zwangsläufig als die obere Schichtgrenze des in die Atmosphäre eingelagerten Ozons, welches völlig absorbiert. Dieser Tatbestand ist auch schon von Vegard und Tønsberg klar und eindeutig beschrieben und diskutiert worden. Ebenso sind Bernards Messungen bereits von ihm selbst und den Verfassern für den Fall einer Photolumineszenzanregung unter dem Gesichtspunkt der Ozonabsorption behandelt worden. Die Einführung neuer Namen wie „Ozondämmerung“ und „Ozonschatten“^{*)} vermehren zwar die Anzahl der in der Meteorologie vorhandenen Bezeichnungen, umschreiben aber nur einen physikalisch lange bekannten und experimentell untersuchten Tatbestand.

Die Tatsache, daß die Messungen zu einer definierten Lagebestimmung für die abschirmende Höhe a führen, läßt darauf schließen, daß die Ozonschicht nach oben optisch scharf begrenzt ist. Es zeigt sich, daß physikalisch plausible Annahmen oder Extrapolationen für den Verlauf der Ozonkonzentration mit der Höhe bei Benutzung der experimentell bekannten Ozon-Absorptionskoeffizienten stets zu dem Ergebnis führen, daß man eine bis auf größenordnungsmäßig etwa 1 km scharf bestimmte Obergrenze einer für streifend durchtretendes ultraviolettes Sonnenlicht praktisch undurchlässigen Atmosphärenschicht zu erwarten hat*).

Die Ergebnisse der verschiedenen Autoren für die untere Grenze und die Dicke der leuchtenden Natriumschicht sind in der Tab. 10 zusammengestellt worden.

Die für die Bernardsche Beobachtung angegebenen Zahlenwerte wurden aus der Zeitdifferenz von 8 min^{*)} für das Durchtreten der Schattengrenze durch die untere bzw. obere Grenze berechnet und stimmen mit den eigenen Ergebnissen innerhalb der Fehlergrenzen befriedigend überein.

Vegard und Tønsberg teilen ihre Zahlenwerte ohne weitere Einzelheiten über die zugehörigen Meßdaten mit. Das Verschwinden der *D*-Linien-Anregung unterhalb 85 km Höhe führen sie auf den Einfluß von gestreutem Sonnenlicht zurück, welches in dieser Höhe für die Dispersion des benutzten Spektographen mit der *D*-Linien-Emission etwa intensitätsgleich erscheinen soll, so daß sich die *D*-Linien aus dem Kontinuum nicht mehr abheben bzw. als Absorptionslinien erscheinen können. Im Winter 1942/43 haben Vegard und Kvifte¹³⁾ in Oslo erneut Bestimmungen der Dicke der leuchtenden

*) Nähere Einzelheiten für die Durchrechnung dieses Problems werden gesondert in einer weiteren Mitteilung veröffentlicht (U. Stille, erscheint demnächst); siehe auch ⁸⁾.

Tabelle 10. Zusammenstellung
der bisher aus dem Dämmerungsleuchten bestimmten unteren Grenzen und Dicken
der leuchtenden Natriumschicht

Autor	Beobachtungs-		H km	d km	Bemerkungen
	ort	jahr			
<i>Bernard</i>	Tromsø	1937	110	9	für $a = 56$ km
"	"	"	108	9	für $a = 54$ km
<i>Vegard-Tønsberg</i>	Oslo, Tromsø	1939	85	31	
<i>Cario-Stille</i>	Braunschweig	1941	$106,5 \pm 6$	$11,5 \pm 6,5$	
<i>Vegard-Kvifte</i>	Oslo	1942/43	94	16	für $H = 110$ km

Natriumschicht aus Zenithbeobachtungen für den Intensitätsverlauf der D -Linien durchgeführt und der Auswertung ihren Mittelwert von 110 km für die Obergrenze H der Natriumschicht zugrunde gelegt; die beobachteten Werte für die Dicke d schwanken zwischen 8,4 und 27,6 km.

Dispersion und Spaltbreite der jeweils für die Aufnahmen eingesetzten Spektrographen spielen für die Auswertung der photographierten Spektren auf Intensitätsabnahme und Verschwinden der D -Linien zweifellos eine Rolle. Hohe Dispersion und enger Spalt führen zu einer weitgehenden Unterdrückung eines evtl. vorhandenen und die Intensitätsbestimmung von Linien störenden Kontinuums. Der idealen Erfüllung dieser Forderungen stehen aber die zur Erzielung eines hohen zeitlichen Auflösungsvermögens erforderlichen kurzen Belichtungszeiten entgegen*).

Leider ist das bisher vorliegende experimentelle Material über eine untere Grenze und damit eine Schichtdicke der leuchtenden Natriumschicht noch sehr gering. Während die Existenz und Lage einer scharfen oberen Grenze für die leuchtende Natriumschicht wohl bereits außer Zweifel steht, kann zurzeit noch nicht eindeutig entschieden werden, ob eine entsprechende untere Schichtgrenze vorhanden ist, bzw. wenn sie beobachtet wird, in welcher Höhe sie liegt. Ebenso läßt sich noch nichts darüber aussagen, ob eine solche Untergrenze immer oder nur gelegentlich festzustellen ist und ob ihre Höhenlage zeitlich variiert oder nicht. Wie die Verfasser schon in der vorausgegangenen Veröffentlichung⁵⁾ betonten, ist eine solche untere Grenze der während der Dämmerung leuchtenden Natriumschicht, wenn sie überhaupt vorhanden ist, wahrscheinlich weniger scharf definiert als die obere Schichtgrenze.

Es sei hier nochmals darauf hingewiesen, daß die Beobachtungen des Natriumdämmerungsleuchtens lediglich zu einer Festlegung für die Schichtgrenzen des leuchtenden — d.h. des die D -Linien emittierenden Natriums führt. Solche optisch bestimmten Schichtgrenzen sagen also zunächst noch nichts über ein etwa gleichermaßen schichtweises Auftreten des Natriums selbst bzw. von Natriumverbindungen in der Atmosphäre aus. Über diesen Punkt wird sich vielleicht im Zusammenhang mit anderen Ergebnissen der

*) Aus diesen Erwägungen über den störenden Einfluß des Streulichtes heraus wurden von den Verfassern auch einige Aufnahmen mit einem 4-Prismenspektrographen hoher Dispersion gemacht. Trotz der relativ großen Lichtstärke, welche dieses Instrument aufweist (Kammerobjektiv 1 : 1), konnten jedoch infolge der höheren Reflexionsverluste usw. die Belichtungszeiten bisher nicht auf das erforderliche Maß herabgedrückt werden.

Atmosphärenforschung etwas ergeben, wenn der Anregungsmechanismus des Natriumsleuchtens näher geklärt ist.

Zum Schluß möchten die Verfasser noch einmal ausdrücklich betonen, daß über die Verteilung des Natriums in der Atmosphäre bisher experimentell keine Besonderheiten für die Höhe von etwa 80 km sichergestellt werden konnten. Es ist damit natürlich durchaus nicht gesagt, daß sich in 80 km Höhe kein Natrium in der Atmosphäre befindet. Jedoch sind demnach alle Überlegungen, welche die Existenz von Natrium in dieser Höhenlage voraussetzen — z. B. die Deutung der Ionisation der *D*-Schicht als Na^+ -Ionen^{6, 10, 11}) — bisher experimentell noch nicht fundiert und als reine Arbeitshypothesen zu werten.

Die Beschreibung einer gleichzeitigen Beobachtung von Dämmerungseffekt an den *D*-Linien und überlagertem starkem Nordlicht (1.3.1941), sowie eine allgemeine Diskussion der Herkunft und Anregung des in der oberen Atmosphäre leuchtenden Natriums sollen in weiteren Veröffentlichungen der Verfasser erfolgen.

Zusammenfassung

In der vorliegenden Veröffentlichung werden die Meßanordnung und die Ergebnisse von im Jahre 1941 in Braunschweig durchgeführten Beobachtungen des Natriumleuchtens geschildert. Mit einem sehr lichtstarken Spektographen wurden in zwei verschiedenen Richtungen (Zenith und Horizont) während der Morgen- und Abenddämmerung in kurzer zeitlicher Folge Serien von Spektren des Dämmerungsleuchtens aufgenommen, aus denen der zeitliche Intensitätsverlauf der *D*-Linien-Emission festgelegt werden konnte. Die Auswertung der Aufnahmen ergibt, daß die Anregung des Natriumleuchtens im Dämmerungshimmel als Photoluminiszenzeffekt durch ultraviolette Sonnenstrahlung zu deuten ist, für welche das in der Atmosphäre vorhandene Ozon eine optisch undurchlässige Schicht darstellt. Die mit der oberen Grenze des atmosphärischen Ozons zusammenfallende scharf definierte Abschirmungshöhe wurde im Mittel zu $\bar{a} = 54 \pm 3$ km bestimmt. Für das im Dämmerungsleuchten emittierende Natrium ergab sich gleichfalls eine scharfe obere Grenze bei im Mittel $\bar{H} = 118 \pm 2,5$ km Höhe. Gelegentliche Beobachtungen deuten auf eine weniger ausgeprägte untere Grenze der leuchtenden Natriumschicht in $106,5 \pm 6$ km Höhe hin, woraus eine Dicke von $d = 11,5 \pm 6,5$ km für diese Schicht folgen würde. In einer eingehenden Fehlerdiskussion wurden für die verschiedenen apparativ bedingten Fehlerquellen die entsprechenden Fehlergrenzen abgeschätzt; es zeigte sich, daß Ungleichmäßigkeiten in den atmosphärischen Sichtverhältnissen offensichtlich keinen merklichen Einfluß auf die Meßgenauigkeit haben. Ein Vergleich mit den Ergebnissen von Bernard bzw. Vegard, Tønsberg und Kvifte ergibt eine befriedigende Übereinstimmung zwischen den verschiedenen Resultaten — bis auf die Bestimmung der unteren Grenze, die erhebliche Abweichungen zwischen den verschiedenen Autoren aufweist und vielleicht wegen des hier stärker in Erscheinung tretenden kontinuierlichen Streuuntergrundes noch stark vom jeweils benutzten Spektographen abhängt.

Literatur

- ¹⁾ R. Bernard, C. R. **206**, 448, 1938; ZS. f. Phys. **110**, 291, 1938.
- ²⁾ Ders., ZS. f. Phys. **110**, 291, 1938.
- ³⁾ G. Cario und H. Haffner, Verh. d. D. Phys. Ges. (3) **18**, 11, 1937.
- ⁴⁾ G. Cario und U. Stille, ZS. f. Phys. **113**, 442, 1939.
- ⁵⁾ G. Cario und U. Stille, ZS. f. Phys. **116**, 122, 1940.
- ⁶⁾ Jouaust und Vassy, C. R. **213**, 139, 1941.
- ⁷⁾ R. Penndorf, Z. Meteorol. **1**, 345, 1947.
- ⁸⁾ Ders., Meteorol. ZS **60**, 401, 1943.
- ⁹⁾ U. Stille, ZS. f. Phys. **120**, 703, 1943.
- ¹⁰⁾ A. Vassy und E. Vassy, C. R. **214**, 282, 1942.
- ¹¹⁾ Dieselben, Journ. de phys. et le Radium (VIII), **3**, 8, 1942.
- ¹²⁾ L. Vegard, Nature **162**, 300, 1948.
- ¹³⁾ L. Vegard und G. Kvifte, Geofys. Publ. Oslo **16**, Nr. 7, 1945.
- ¹⁴⁾ L. Vegard und E. Tønsberg, Geofys. Publ. Oslo **13**, Nr. 1, 1940.